



⑩ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑨ DE 101 14 969 A 1

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
F 04 D 19/  
F 04 B 49/06

① Aktenzeichen: 101 14 969.7  
② Anmeldetag: 27. 3. 2001  
④ Offenlegungstag: 10. 10. 2002

⑦ Anmelder:  
Leybold Vakuum GmbH, 50968 Köln, DE  
⑧ Vertreter:  
Patentanwälte von Kreisler, Selting, Werner et col.,  
50667 Köln

⑦ Erfinder:  
Blumenthal, Roland, Dr., 50374 Erftstadt, DE;  
Odendahl, Heinz-Dieter, 51061 Köln, DE; Bohr  
Dieter, 50677 Köln, DE

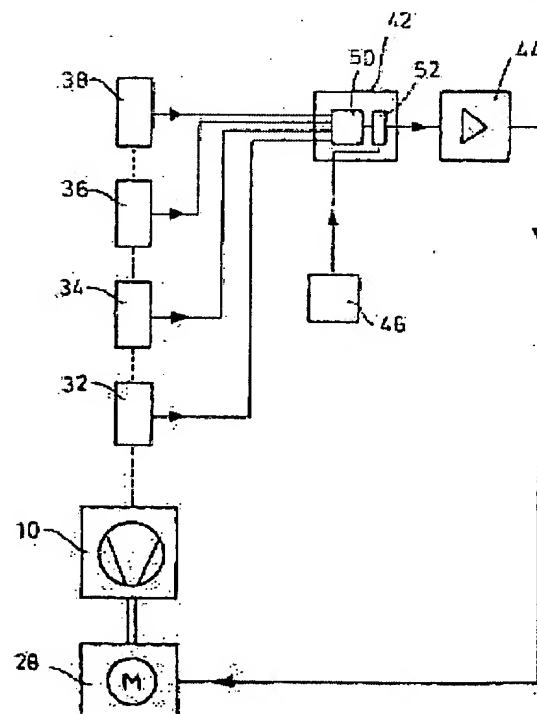
⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Bet  
zu ziehende Druckschriften:

DE 198 33 040 A1  
DE 697 01 845 T2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤ Turbomolekularpumpe

⑤ Eine Turbomolekularpumpe (10) weist einen Stator, einen Pumpenrotor, einen Motor (28) zum Antrieb des Pumpenrotors und eine Steuervorrichtung (42) auf. Die Steuervorrichtung (42) regelt die Motorleistung, derart, dass die Motorleistung eine zulässige Motor-Maximalleistung nicht übersteigt. An der Turbomolekularpumpe (10) sind statorseitig Temperaturgeber (32-38) zur Messung der Statortemperatur angeordnet. Die Steuervorrichtung (42) weist eine Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) auf, die die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von der gemessenen Statortemperatur bestimmt. Auf diese Weise wird die zulässige Motor-Maximalleistung nicht auf einen konstanten Wert eingestellt, sondern stets in Abhängigkeit von der Statortemperatur festgelegt. Dadurch kann das Leistungsvermögen des Motors voll ausgenutzt werden, solange die gemessene Statortemperatur unterhalb eines Maximalwertes liegt.



DE 101 14 969 A 1

BEST AVAILABLE COPY

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Turbomolekularpumpe mit einem Pumpenstator, einem schnell drehenden Pumpenrotor und einem Motor zum Antrieb des Pumpenrotors.

[0002] In einer Turbomolekularpumpe werden zur Erzeugung eines Hochvakuums ein Gas bzw. Gasteilchen durch rotierende Schaufeln des Pumpenrotors und die feststehenden Schaufeln des Pumpenstators auf ein Vielfaches des Eingangsdruckes verdichtet. Die durch die Gasverdichtung und Gasreibung verursachte Gaserwärmung wird überwiegend über den Pumpenrotor und den Pumpenstator wieder abgeführt. Während die Kühlung des Pumpenstators durch ein Kühlfluid führende Kühlkanäle erfolgen kann, ist die aktive Pumpenrotorkühlung problematisch, da dem rotierenden Pumpenrotor kein Kühlfluid zugeführt werden kann. Unter ungünstigen Betriebsbedingungen kann der Pumpenrotor daher überhitzen. Bei Überhitzung des Pumpenrotors über eine maximal zulässige Rotortemperatur besteht die Gefahr der Zerstörung des Pumpenrotors und, als Folge davon, des Pumpenstators. Die Turbomolekularpumpe muss daher stets unterhalb der maximal zulässigen Rotortemperatur betrieben werden.

[0003] Eine direkte Messung der Rotortemperatur ist wegen der schwierigen Signalführrichtung von dem schnell drehenden Pumpenrotor zu dem Stator nur mit großem Aufwand möglich. Die Turbomolekularpumpe weist daher eine Steuervorrichtung auf, die die Motorleistung auf eine vorgegebene konstante Motor-Maximalleistung begrenzt, so dass auch die Pumpleistung und die damit korrelierende Gas- und Rotorerwärmung auf einen konstanten Maximalwert begrenzt sind.

[0004] Die zulässige Motor-Maximalleistung wird rechnerisch und/oder experimentell ermittelt, indem für den Pumpenbetrieb die ungünstigsten Prozessbedingungen angenommen werden, beispielsweise ein thermisch sich ungünstig verhaltendes Gas, eine schlechte Pumpenstator-Kühlung, hohe Umgebungstemperaturen etc. Die zulässige Motor-Maximalleistung wird so gewählt, dass der Pumpenrotor auch unter den ungünstigsten Prozessbedingungen die maximal zulässige Rotortemperatur nicht überschreiten kann. Durch die Festlegung einer konstanten Motor-Maximalleistung wird die Motorleistung auf die vorgegebene Maximalleistung auch dann beschränkt, wenn die Prozessbedingungen günstiger sind, als für die Berechnung der Motor-Maximalleistung angenommen. Die Motorleistung wird also auch dann auf die vorgegebene Motor-Maximalleistung begrenzt, wenn die tatsächliche Rotortemperatur die maximal zulässige Rotortemperatur noch nicht erreicht hat. Da die der Ermittlung der maximal zulässigen Motor-Maximalleistung zugrundegelegten extremen Prozessbedingungen in der Praxis nur einen seltenen Ausnahmefall darstellen, wird die Ausgangsleistung der Turbomolekularpumpe in der Regel auf einen Wert weit unterhalb eines tatsächlich thermisch zulässigen Wertes beschränkt.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Vorrichtung und ein Verfahren zu schaffen, mit dem die Ausgangsleistung einer Turbomolekularpumpe erhöht wird.

[0006] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst mit den Merkmalen der Ansprüche 1 bzw. 11.

[0007] Gemäß der Erfindung ist an dem Pumpenstator ein Temperaturgeber zur Messung der Statortemperatur angeordnet. Ferner weist die Steuervorrichtung eine Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung auf, die die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von der gemessenen Statortemperatur bestimmt. Die zulässige Motor-Maximalleistung ist also kein konstanter unveränderbarer Wert, sondern

wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Statortemperatur bestimmt. Die Rotortemperatur korreliert stark mit der Temperatur der statorseitigen Teile der Pumpe, beispielsweise mit der Temperatur des Basisflansches, des Pumpengehäuses, des Motorgehäuses, des Lagergehäuses, des Pumpenstators, des Motors sowie mit der tatsächlichen Motor- bzw. Pumpleistung. Die Statortemperatur gibt daher Auskunft über die Rotortemperatur, so dass durch Messung der Statortemperatur und Begrenzung der zulässigen Motor-Maximalleistung für die jeweilige Statortemperatur auch die Rotortemperatur zuverlässig auf einen Maximalwert begrenzt werden kann. Durch die Messung der Statortemperatur und die dadurch vornehmbaren Rückschlüsse auf die Rotortemperatur, ist die zulässige Motor-Maximalleistung an die jeweilige thermische Situation angepasst, und liegt damit in der Regel oberhalb einer für ungünstigste thermische Umstände bestimmten konstanten zulässigen Motor-Maximalleistung. Die tatsächliche Motorleistung und damit die Ausgangsleistung der Pumpe kann auf diese Weise unter normalen Prozessbedingungen deutlich erhöht werden. Gleichzeitig ist der Pumpenrotor zuverlässiger gegen Überhitzung d. h. Überschreiten der maximal zulässigen Rotortemperatur geschützt, da eine indirekte Überwachung der Rotortemperatur stattfindet.

[0008] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung weist die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung eine Rotortemperatur-Ermittlungsvorrichtung auf, die aus der von dem Temperaturgeber gemessenen Statortemperatur die Rotortemperatur ermittelt. Anschließend bestimmt die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung in Abhängigkeit von der ermittelten Rotortemperatur die zulässige Motor-Maximalleistung.

[0009] Die Rotortemperatur-Ermittlungsvorrichtung ermittelt die Motor-Rotortemperatur aus einer oder aus mehreren verschiedenen Statortemperaturen, die in ein Polynom eingesetzt werden, dessen konstante Koeffizienten zuvor experimentell ermittelt wurden. Auf diese Weise lässt sich schließlich die zulässige Motor-Maximalleistung schnell und auch mit wenig Speicherplatz ermitteln. Die Begrenzung der Motor-Maximalleistung kann ggf. erst bei Erreichen einer Schwellentemperatur des Rotors eingreifen und die zulässige Motor-Maximalleistung begrenzen, während die Motor-Maximalleistung nicht begrenzt ist, solange die errechnete Rotortemperatur unterhalb der Schwellentemperatur liegt. Die zulässige Motor-Maximalleistung kann auch direkt aus einem Polynom ermittelt werden, das nach der zulässigen Motor-Maximalleistung aufgelöst ist und in der die Rotor-Schwellentemperatur und/oder eine Rotor-Maximaltemperatur in Form von Koeffizienten bereits enthalten ist.

[0010] Die anhand der Koeffizienten berechnete Motor-Maximalleistung kann ggf. noch zusätzlich durch andere Parameter begrenzt werden.

[0011] Vorzugsweise sind mehrere Temperaturgeber an verschiedenen Stellen des Stators vorgesehen, wobei die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von den gemessenen Temperaturen aller Temperaturgeber bestimmt. Die Temperaturgeber können an dem Gehäuse der Turbomolekularpumpe, an einem Pumpenstatorelement, an einem statorseitigen Teil des Motors, beispielsweise an dem Motorgehäuse oder an der Motorwicklung, oder in einem Kühlkanal des Pumpenstators angeordnet sein. Die Temperaturgeber können auch an anderen statorseitigen Stellen der Turbomolekularpumpe angeordnet sein, deren Temperatur und Temperaturverhalten zuverlässige Rückschlüsse auf die Temperatur des Rotors zulassen. Auf diese Weise wird aus einer Vielzahl von gemessenen Temperaturen ein genauer Rück-

schluss auf die Rotortemperatur und damit auf die zulässige Motor-Maximalleistung ermöglicht. Die Begrenzung der Motorleistung erfolgt daher nah an der objektiv zulässigen Motor-Maximalleistung. Die Ermittlung der Rotortemperatur und der zulässigen Motor-Maximalleistung durch mehrere statorseitige Temperaturegeber ist so zuverlässig und genau, dass nur geringe Sicherheitsspannen vorgesehen werden müssen, um ein Überhitzen des Rotors zu vermeiden. Auf diese Weise kann der Motor mit einem Maximum an thermisch zulässiger Leistung angesteuert werden, d. h. das Leistungspotential des Motors und der Pumpe können stets annähernd vollständig ausgeschöpft werden.

[0012] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung weist die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung einen Kennfeldspeicher auf, in dem in einem Kennfeld die zulässige Motor-Maximalleistung für jede Statorortemperatur gespeichert ist. In dem Kennfeld lässt sich auch eine komplexe nicht-lineare Kennlinie speichern, so dass eine aufwendige Ermittlung der zulässigen Motor-Maximalleistung durch Rechenoperationen entfallen kann.

[0013] Gemäß einem nebengeordneten Verfahren zur Begrenzung der maximal zulässigen Motorleistung eines Motors in einer Turbomolekularpumpe, der einen in einem Pumpenstator gelagerten Pumpenrotor antreibt, sind folgende Verfahrensschritte vorgesehen: Messen der Pumpenstatortemperatur, Ermitteln einer zulässigen Motor-Maximalleistung aus der gemessenen Pumpenstatortemperatur und Begrenzung der Motorleistung auf die ermittelte zulässige Motor-Maximalleistung.

[0014] In folgenden wird unter Bezugnahme auf die Figuren ein Ausführungsbeispiel der Erfindung näher erläutert.

[0015] Es zeigen:

[0016] Fig. 1 eine Turbomolekularpumpe im Längsschnitt mit mehreren Temperaturegebern,

[0017] Fig. 2 ein Blockschaltbild der Regelung der Turbomolekularpumpe der Fig. 1,

[0018] In Fig. 1 ist eine Turbomolekularpumpe 10 dargestellt, die ein Pumpengehäuse 12 aufweist, dessen einen Längsende die Saugseite 14 bildet und dessen anderes Ende die Druckseite bildet und einem Gasauslass 16 aufweist. In dem Pumpengehäuse 12 ist ein Pumpenstator 18 angeordnet, der einen Pumpenrotor 20 umfasst. Der Pumpenrotor 20 weist eine Rotorwelle 22 auf, die mit zwei Radialmagnetlagern 24, 26 und einem nicht dargestellten Axiallager drehbar in dem Pumpengehäuse 12 gelagert ist. Die Rotorwelle 22 und der damit verbundene Pumpenrotor 20 werden durch einen Elektromotor 28 angetrieben. Der Elektromotor 28 und die beiden Radial-Magnetlager 24, 26 sind in einem gemeinsamen Lager-Motor-Gehäuse 30 untergebracht. Das Pumpengehäuse 12 wird durch ein Kühlmittel gekühlt, das durch einen Kühlkanal 13 in dem Pumpengehäuse 12 fließt. Die Turbomolekularpumpe 10 dient der Erzeugung eines Hochvakuums und dreht mit Drehzahlen bis zu 100 000 U/min.

[0019] Die Turbomolekularpumpe 10 weist statorseitig, d. h. auf der Seite der feststehenden Teile, mehrere Temperaturegeber 32-38 auf. Ein erster Temperaturegeber 32 ist im Bereich des Basisflansches des Pumpengehäuses 12 angeordnet. Ein zweiter Temperaturegeber 34 ist an bzw. in dem Pumpenstator 18 angeordnet. Ein dritter Temperaturegeber 36 ist an dem Motor 28 angeordnet und misst die im Bereich der Motorspulen bzw. der Motor-Magnetlebleche herrschende Temperatur. Ein vierter Temperaturegeber 38 ist an dem Lager-Motorgehäuse 30 angeordnet. Ein weiterer Temperaturegeber kann im Verlauf des Kühlkanals 13 angeordnet sein.

[0020] Die durch die Gaserwärmung des komprimierten Gases auf den Pumpenrotor 20 übertragene und durch die

aktiven Magnetlager 26 und den Elektromotor 28 in der Pumpenrotor 20 induzierte Wärme wird im Wesentlichen durch Wärmestrahlung von dem Pumpenrotor 20 auf die statorseitigen Teile abgeführt. Die statorseitigen Teile, als das Pumpengehäuse 12, der Pumpenstator 18, das Lager-Motor-Gehäuse 30 sowie die Magnetlager 24, 26 und der Elektromotor 28 werden also neben ihrer Eigenwärme auch durch die von dem Pumpenrotor 20 auf sie abgestrahlte Wärme erwärmt. Die Messung der Temperatur und des Temperaturverlaufes der genannten statorseitigen Teile erlaubt daher Rückschlüsse auf die Rotortemperatur.

[0021] Die Beziehung zwischen der tatsächlichen Temperatur des Pumpenrotors 20 und den von den Temperaturegebern 32-38 gemessenen Temperaturen der statorseitigen Teile lässt sich mit einem einfachen Versuchsaufbau ermitteln. Hierzu wird saugseitig ein Rotor-Temperaturegeber 4 in geeigneter Weise möglichst nah an dem Pumpenrotor 20 angeordnet. Auf diese Weise kann die Rotortemperatur in Experiment direkt gemessen werden, so dass der Zusammenhang zwischen der Rotortemperatur und den von den statorseitigen Temperaturegebern 32-38 gemessenen Temperaturen unter verschiedenen Prozessbedingungen aufgezeichnet werden kann. Aus den von allen Temperaturegebern 32-40 aufgezeichneten Temperaturen und Temperaturverläufen lässt sich ein Polynom für die Motorleistung  $P$  in Abhängigkeit von der Rotortemperatur und den statorseitigen Temperaturen ermitteln:

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 T_1^{\beta_1} + \alpha_2 T_2^{\beta_2} + \alpha_3 T_3^{\beta_3} \dots \alpha_n T_n^{\beta_n}$$

[0022]  $P$  ist die momentane Motorleistung,  $T_1$  bis  $T_n$  sind die jeweils gemessenen Temperaturen der statorseitigen Temperaturegeber 32-38 und des Rotortemperaturegebers 4. Die Koeffizienten  $\alpha_0$  bis  $\alpha_n$  sowie  $\beta_1$  bis  $\beta_n$  sind Konstanten, die durch die Auswertung der experimentell gemessenen Pumpenrotor- und Pumpenstatortemperaturen ermittelt werden. Gibt man anstelle der gemessenen Rotortemperatur die maximal zulässige Rotortemperatur in dieses Polynom ein, so wird mit diesem Polynom die zulässige Motor-Maximalleistung  $P_{\max}$  ermittelt.

[0023] Damit liegt ein Polynom vor, mit dem für eine Satz gleichzeitig gemessener Statortemperaturen  $T_1$  bis  $T_n$  jeweils die zulässige Motor-Maximalleistung  $P_{\max}$  errechnet werden kann.

[0024] In Fig. 2 ist schematisch die Steuerung des Pumpenrotormotors 28 dargestellt. Eine Steuervorrichtung 4 steuert einen Motortreiber 44, der wiederum die Spulen des Elektromotors 28 ansteuert. Über ein Stellelement 46 wird ein Motor-Leistungssollwert an die Steuervorrichtung 4 ausgegeben. Die Steuervorrichtung 42 weist eine Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung 50 und einen Leistungsabgrenzer 52 auf. In der Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung 50 wird aus den von den vier Temperaturegebern 32-38 gelieferten Temperaturwerten nach der o. a. Form die zulässige Motor-Maximalleistung  $P_{\max}$  ermittelt. In der Leistungsabgrenzer 52 wird der von dem Stellelement 4 gelieferte Motorleistungssollwert auf die ermittelte zulässige Motor-Maximalleistung begrenzt, falls der von dem Stellelement 4 angegebene Leistungswert größer als die ermittelte zulässige Motor-Maximalleistung ist. Auf diese Weise wird die Rotortemperatur auf eine Maximaltemperatur begrenzt, so dass der Rotor vor Zerstörung durch Überhitzung geschützt ist.

[0025] Als weitere Parameter für die Ermittlung der zulässigen Motor-Maximalleistung können neben der Kühlmitteltemperatur auch die tatsächliche Motorleistung, die Umgebungstemperatur und andere Messgrößen genutzt werden.

[0026] Mit der beschriebenen Vorrichtung lässt sich über mehrere statorseitige Temperaturegeber auf die vorliegende

Rotortemperatur schließen. Um eine Überhitzung des Pumpenrotors auf eine Temperatur oberhalb einer maximalen Rotortemperatur zu vermeiden, wird aus der ermittelten Rotortemperatur eine zulässige Motor-Maximalleistung ermittelt, auf die die Motorleistung begrenzt ist. Die zulässige Motor-Maximalleistung ist also variabel, so dass das Leistungsvermögen des Motors und der Pumpe voll ausgeschöpft werden kann, und nur bei Überhitzungsgefahr begrenzt wird.

#### Patentansprüche

1. Turbomolekularpumpe mit einem Stator (12, 18), einem Pumpenrotor (20), einem Motor (28) zum Antrieb des Pumpenrotors (20) und einer Steuervorrichtung (42) zur Steuerung des Motors (28), wobei die Steuervorrichtung (42) die Motorleistung derart regelt, dass die Motorleistung eine zulässige Motor-Maximalleistung nicht übersteigt, dadurch gekennzeichnet, dass statorseitig ein Temperaturgeber (32-38) zur Messung der Statortemperatur angeordnet ist, und dass die Steuervorrichtung (42) eine Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) aufweist, die die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von der gemessenen Statortemperatur bestimmt.
2. Turbomolekularpumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Temperaturgeber (32-38) an verschiedenen Stellen des Stators (12, 18) vorgesehen sind und die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von den gemessenen Temperaturen aller Temperaturgeber (32-38) bestimmt.
3. Turbomolekularpumpe nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) eine Rotortemperatur-Ermittlungsvorrichtung zugeordnet ist, die aus der von dem Temperaturgeber (32-38) gemessenen Statortemperatur die Rotortemperatur ermittelt und dass die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) die zulässige Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von der ermittelten Rotortemperatur bestimmt.
4. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, dass die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) die zulässige Motor-Maximalleistung mit Hilfe eines Polynom ermittelt.
5. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, dass die Maximalleistungs-Ermittlungsvorrichtung (50) einen Kennfeldspeicher aufweist, in dem in einem Kennfeld die zulässige Motor-Maximalleistung für jede Statortemperatur gespeichert ist.
6. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturgeber (32) an einem Pumpengehäuse (12) vorgesehen ist.
7. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturgeber (34) an einem Pumpenstator (18) vorgesehen ist.
8. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturgeber (36) an einem statorseitigen Teil des Motors (28) vorgesehen ist.
9. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass der Motor (28) ein Gehäuse (30) aufweist und der Temperaturgeber (38) an dem Motorgehäuse vorgesehen ist.
10. Turbomolekularpumpe nach einem der Ansprüche 1-9, dadurch gekennzeichnet, dass das Pumpenge-

häuse (12) oder das Pumpenstatorelement (18) eine Kühlkanal (13) aufweist und dass der Temperaturgeber im Verlauf des Kühlkanals (13) angeordnet ist.

11. Verfahren zur Begrenzung der Motorleistung eines Motors (28) in einer Turbomolekularpumpe (10), die einen in einem Stator (12, 18) gelagerten Pumpenrotor (20) antreibt, mit den Verfahrensschritten

Messen der Pumpenstatortemperatur,

Ermitteln einer zulässigen Motor-Maximalleistung in Abhängigkeit von der gemessenen Pumpenstatortemperatur,

Begrenzung der Motorleistung auf die ermittelte zulässige Motor-Maximalleistung.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Ermitteln der zulässigen Motor-Maximalleistung aus den Schritten

Errechnen der Pumpenrotortemperatur aus der gemessenen Pumpenstatortemperatur,

Ermitteln der zulässigen Motor-Maximalleistung auf der errechneten Pumpenrotortemperatur besteht.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

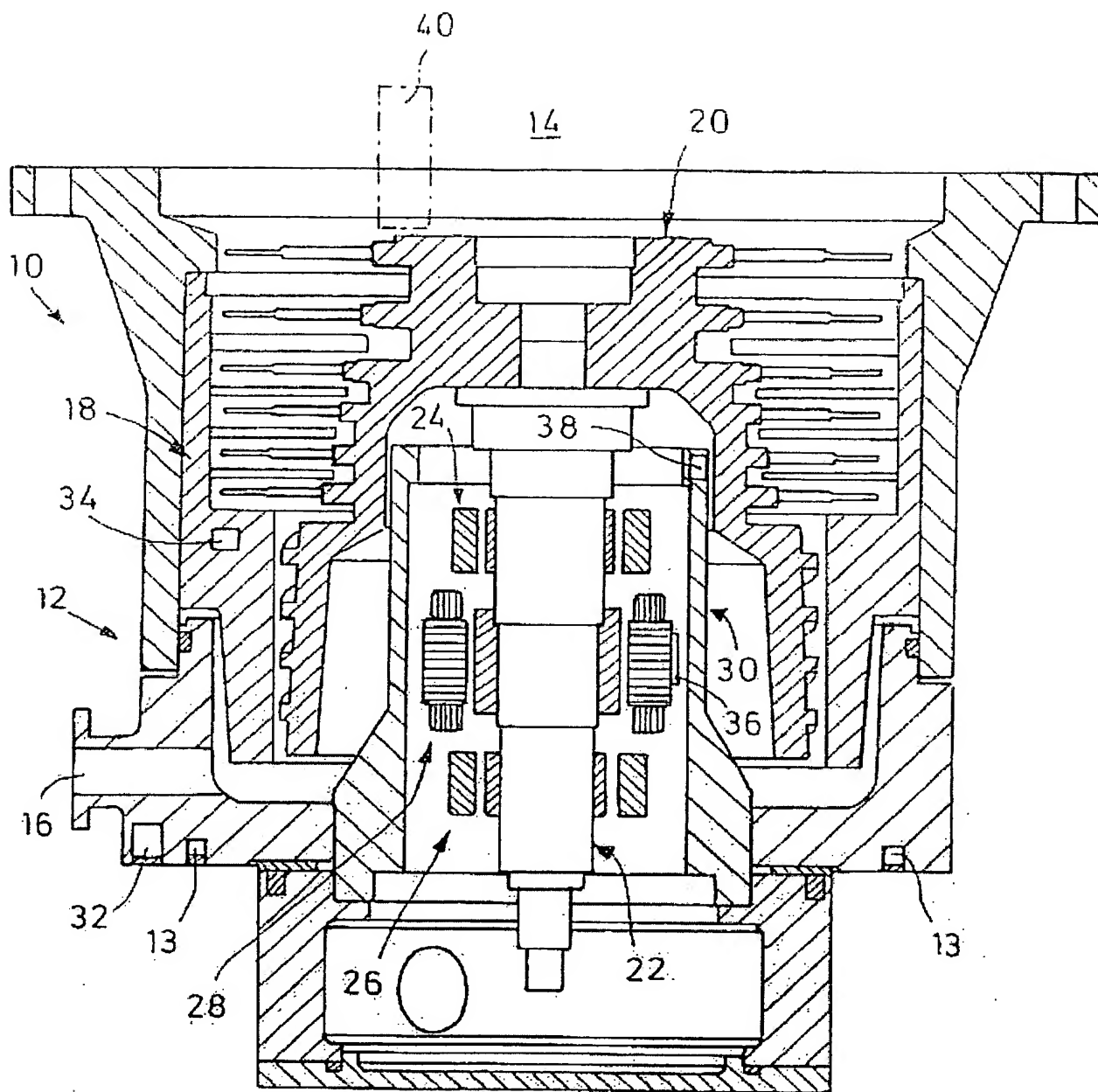


FIG.1

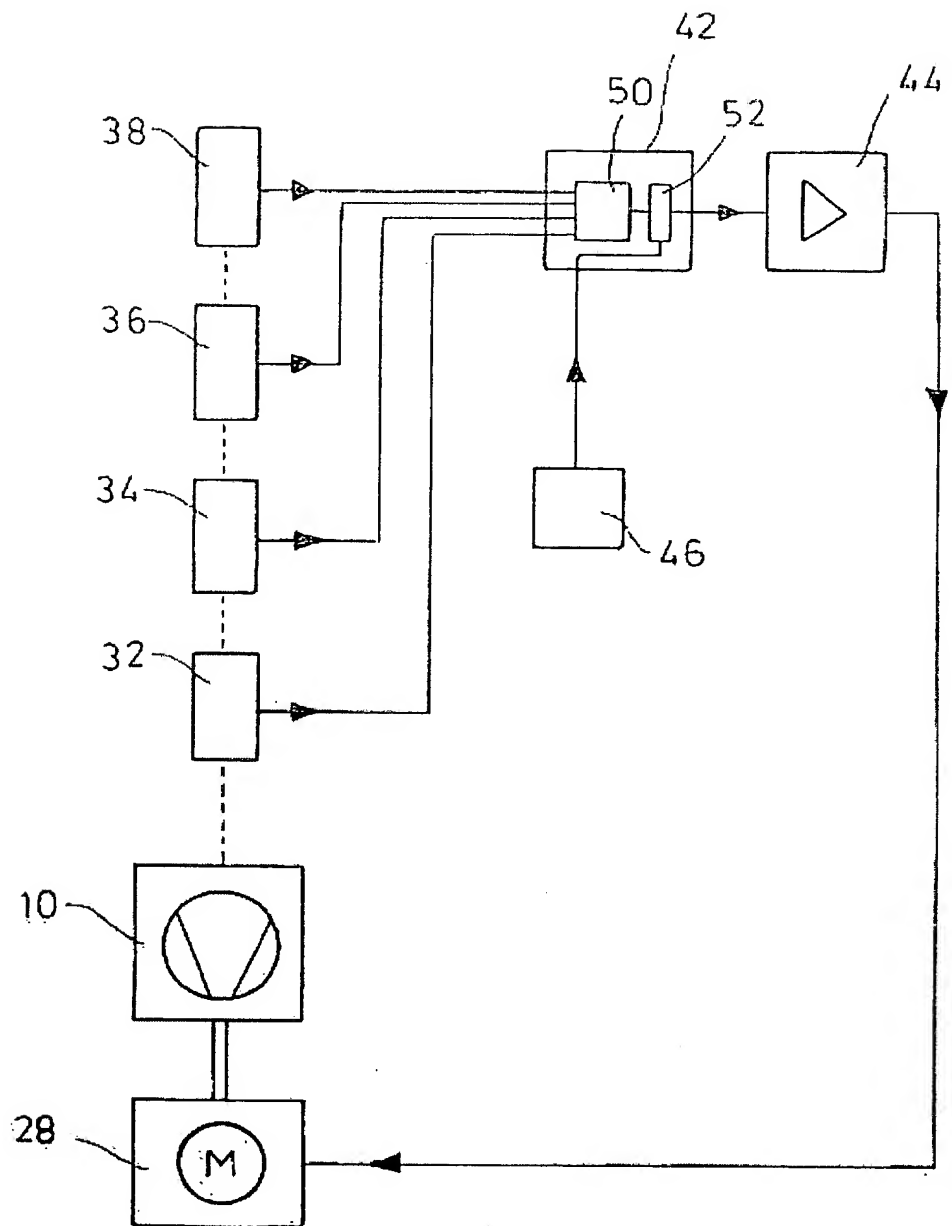


FIG. 2